

METHOD AND APPARATUS FOR SPATIALLY RESOLVED POLARIMETRY

- 5 Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur orts aufgelösten polarimetrischen Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels, das von einer zugehörigen Strahlungsquelle erzeugt wird.
- 10 Verfahren und Vorrichtungen dieser Art sind zur Bestimmung des Einflusses, den ein untersuchtes optisches System auf den Polarisationszustand optischer Strahlung hat, in der älteren deutschen Patentanmeldung 103 04 822.7 und der parallelen älteren US-Anmeldung 10/628,431 beschrieben. Der Inhalt dieser beiden Anmeldungen der
- 15 Anmelderin wird durch Verweis in vollem Umfang hierin aufgenommen. Die dort beschriebenen Verfahren und Vorrichtungen dienen insbesondere der orts aufgelösten und polarisationsempfindlichen Vermessung optischer Systeme unter Verwendung einer interferometrischen Wellenfrontmesstechnik, wie laterale Scherinterferometrie oder Punktbeugungsinterferometrie. Speziell erlaubt dies eine pupillenaufgelöste,
- 20 polarisationsempfindliche Wellenfrontvermessung von Projektionsobjektiven für die Mikrolithografie, wenn gewünscht mit Ermittlung der

sogenannten phasenreduzierten oder der vollständigen Jones-Matrix bzw. des sogenannten Stokes-Vektors. Dabei wird eine Polarisationsanalysatoranordnung benutzt, die wenigstens ein drehbares Polarisations-
5 element, wie eine $\lambda/4$ -Platte benutzt. Zur Vermeidung solcher aktiv beweglicher Teile der Polarisationsanalysatoranordnung wird alternativ eine Analysatorvariante vorgeschlagen, bei der als Kompensator mehrere einzelne Kompensatorelemente, wie einzelne $\lambda/4$ -Platten, mit in einer vorgegebenen Beziehung zueinander verdrehten Polarisationsrichtungen fest nebeneinander liegend
10 angeordnet sind.

Im Stand der Technik sind sogenannte photoelastische Modulatoren (PEM) bekannt, bei denen es sich um optische Komponenten handelt, die wie Kompensatoren mit zeitlich variierender Retardation, d.h.
15 Verzögerungsphase, wirken. Physikalisch gesehen handelt es sich um Elemente aus Materialien, die einen Spannungsdoppelbrechungseffekt zeigen, der von der Stärke des z.B. durch akustische Schwingungen ausgeübten Drucks abhängt. Die Frequenz der Modulation bzw. zeitlich variierenden Retardation eines solchen PEM beträgt typischerweise
20 einige 10 kHz, je nach seiner mechanischen Dimensionierung. Es sei hierzu stellvertretend auf die Zeitschriftenaufsätze H.P. Povel et al., „Two-dimensional polarimeter with a charge-coupled-device image sensor and a piezoelastic modulator“, Appl. Opt. 33 (1994), S. 4254, Povel et al., „Charge-coupled-device image sensor as a demodulator in
25 a 2-D polarimeter with a piezoelastic modulator“, Appl. Opt. 29 (1990), S. 1186 und D. Wroblewski und L.L. Lao, „Polarimetry of motional Stark effect and determination of current profiles in DIII-D (invited)“, Rev. Sci. Instr. 63 (1992), S. 5140 hingewiesen.

30 Solche photoelastischen Modulatoren werden z.B. für Wellenlängen vom sichtbaren Bereich bis hin zum VUV-Bereich bei ca. 130 nm von der Firma Hinds Instruments Inc., Hillsboro, Oregon, USA hergestellt und

vertrieben. Weitere Details auch bezüglich der Verwendung von PEMs für polarisationsempfindliche Messtechniken an einem Probenstrahl, einschließlich der Bestimmung eines vollständigen Stokes-Vektors, sind in den Patent- und Offenlegungsschriften US 6.473.179 B1, 5 US 6.473.181 B1, US 5.886.810 A1, US 5.744.721 A1, US 5.652.673 A1 und US 6.268.914 B1 angegeben. Die dort offenbarten Messtechniken befassen sich nicht mit der polarimetrischen Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels, d.h. der gleichzeitigen polarimetrischen Untersuchung eines Bündels von Strahlen, sondern eines jeweiligen 10 Probenstrahls. Bei Verwendung eines aufgelösten Detektors zur Bilddetektion mit Belichtungs- und Auslesezeiten von typischerweise ca. 100 ms, wie z.B. einer CCD-Kamera, würde bei den dort beschriebenen Systemen die PEM-Modulation über die Mess- und Auslesezeit hinweg gemittelt, d.h. die beschriebene modulationsempfindliche Auswertemethode ist nicht anwendbar. 15

Es ist außerdem bekannt, dass die Messung der Stokes-Vektoren bei verschiedenen Polarisationszuständen der Beleuchtung eines Objektives zur Bestimmung einer bildfeldaufgelösten Müller-Matrix 20 verwendet werden kann, aus der eine bildfeldaufgelöste Jones-Matrix bestimmbar ist, so dass auf diese Weise grundsätzlich auch eine zweidimensionale Charakterisierung von Strukturen mit Abmessungen im Subwellenlängenbereich möglich ist, siehe die Zeitschriftenaufsätze M. Totzeck et al., „Edge localization of subwavelength structures by use 25 of polarization interferometry and extreme-value criteria“, Applied Optics, Band 39 (2000), Nr. 34, S. 6295 und M. Totzeck et al., „High-resolution measurement of 2D-microstructures by means of Jones-matrix microscopy“, Proceedings of the 2nd Conference on Design and Fabrication, Japan 2000. Zu den Zusammenhängen von Stokes-Vektor 30 und Müller-Matrix-Kalkül, soweit hier von Interesse, sei D. Clark und J.F. Grainger, „Polarized Light and Optical Measurement“, Pergamon Press, Oxford, 1971 erwähnt.

Der Erfindung liegt als technisches Problem die Bereitstellung eines Verfahrens und einer Vorrichtung zugrunde, mit denen sich ein bildgebendes Strahlenbündel mit hoher zeitlicher und örtlicher Auflösung und relativ kurzen Messzeiten polarimetrisch untersuchen lässt. Dabei kann es sich insbesondere um ein bildgebendes Strahlenbündel handeln, das ein Projektionsobjektiv einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage durchläuft und dabei der hochgenauen optischen Vermessung des Objektives z.B. durch eine interferometrische Wellenfrontmesstechnik dient.

Die Erfindung löst dieses Problem in einem ersten Aspekt durch die Bereitstellung eines Verfahrens zur orts aufgelösten polarimetrischen Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels, das von einer zugehörigen Strahlungsquelle erzeugt wird, mit folgenden Schritten: Einbringen eines ersten photoelastischen Modulators, eines zweiten photoelastischen Modulators und eines Polarisationselements seriell in das Strahlenbündel; Aktivieren einer ersten Modulationsschwingung des ersten photoelastischen Modulators und einer zweiten Modulationsschwingung des zweiten photoelastischen Modulators; Verwenden einer gepulsten Strahlungsquelle zur Erzeugung des Strahlenbündels und Ansteuern der Strahlungsquelle zum Abgeben eines jeweiligen Strahlungspulses in Abhängigkeit vom Schwingungszustand des ersten photoelastischen Modulators und/oder vom Schwingungszustand des zweiten photoelastischen Modulators; und orts aufgelöstes Detektieren des vom Polarisationselement kommenden Strahlenbündels.

Eine zur Durchführung dieses Verfahrens geeignete Vorrichtung beinhaltet in einem weiteren Aspekt der Erfindung eine gepulste Strahlungsquelle zum Erzeugen des Strahlenbündels, einen ersten und zweiten photoelastischen Modulator und ein Polarisationselement zum seriellen Einbringen in das Strahlenbündel, eine Steuereinheit zur Ansteuerung der

photoelastischen Modulatoren und zur damit korrelierten Ansteuerung der Strahlungsquelle sowie einen Detektor zum orts aufgelösten Detektieren des vom Polarisationsselement kommenden Strahlenbündels.

- 5 Das Verfahren und die Vorrichtung der Erfindung ermöglichen eine orts aufgelöste polarimetrische Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels mit hoher zeitlicher Auflösung bzw. Trennschärfe und kurzen Messzeiten dadurch, dass durch entsprechendes Triggern der gepulsten Strahlungsquelle abhängig vom Modulatorschwingungszustand die
- 10 Strahlungspulse zeitlich genau auf die Phasenlage der Retardation des jeweiligen photoelastischen Modulators abgestimmt werden können.

In einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung werden unterschiedliche Modulationsfrequenzen für die beiden Modulatoren eingestellt und

15 mehrere Messvorgänge bei unterschiedlichen Phasenlagen ihrer Modulation durchgeführt. Aus den Messergebnissen wird dann ein orts aufgelöster Stokes-Vektor bestimmt. Zur Vereinfachung der Berechnung des Stokes-Vektors können die verschiedenen Phasenlagen geschickt gewählt werden, z.B. Messzeitpunkte, bei denen beide Phasen gleich 0°

20 oder gleich 90° oder von den beiden Phasenlagen je eine bei 0° und die andere bei 90° liegt.

Die Differenz der Modulationsfrequenz der beiden Modulatoren kann in vorteilhaften Realisierungen z.B. zwischen 0,1 kHz und 10 kHz, insbesondere in der Größenordnung von 1 kHz, liegen.

25

In einer vorteilhaften Anwendung dient die Erfindung der Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels eines Probensystems, wie eines optischen Abbildungssystems. Speziell kann es sich dabei um ein Projektionsobjektiv einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage handeln,

30 das durch eine interferometrische Wellenfrontmesstechnik vermessen wird, wobei der Polarisations Einfluss berücksichtigt wird.

Bei der Untersuchung des bildgebenden Strahlenbündels ist es vorteilhaft, die beiden photoelastischen Modulatoren mit im Wesentlichen gleichem Abstand von einem Konvergenzpunkt des Strahlenbündels in einer zugehörigen Detektionsoptik zu positionieren, da dann alle
5 Strahlen des Strahlenbündels näherungsweise die gleiche Retardation durch die beiden photoelastischen Modulatoren erfahren.

Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindungen sind in den
10 Zeichnungen dargestellt und werden nachfolgend beschrieben. Hierbei zeigen:

Fig. 1 eine schematische Seitenansicht einer Vorrichtung zur orts-
aufgelösten polarimetrischen Untersuchung eines bildgebenden
15 Strahlenbündels unter Verwendung zweier photoelastischer
Modulatoren und

Fig. 2 ein Diagramm des zeitlichen Verlaufs der Retardation für jeden
der beiden photoelastischen Modulatoren von Fig. 1 mit einge-
20 zeichneten Triggerzeitpunkten zur gepulsten Strahlenbündel-
erzeugung.

Die in Fig. 1 gezeigte Vorrichtung dient zur ortsaufgelösten polarime-
trischen Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels 1, von dem
25 in Fig. 1 der Übersichtlichkeit halber nur zwei Strahlen stellvertretend
wiedergegeben sind und das eine niederaperturige Abbildungsoptik 2
durchläuft, von der stellvertretend der Übersichtlichkeit halber nur eine
eintrittsseitige Linse 2a und eine austrittsseitige Linse 2b gezeigt sind.
Die Abbildungsoptik 2 fungiert als Detektionsoptik und bildet eine Objekt-
30 oder Zwischenbildebene 3 auf eine Detektorfläche 4a eines ortsauflö-
senden Detektors 4 ab, bei dem es sich z.B. um eine CCD-Kamera, eine
Diodenzeile oder ein Diodenarray handeln kann. Eine Auswerteeinheit

10 wertet die vom Detektor 4 gewonnenen Detektionsinformationen aus. Zwischen der Detektionsoptik 2 und dem Detektor 4 ist ein Polarisations-
element 5 eingebracht, das z.B. durch einen Polarisationsstrahl-
teiler realisiert sein kann. Vorzugsweise ist für die Detektionsoptik eine
5 numerische Apertur von kleiner als 0,1 gewählt. Die Detektionsoptik 2
kann z.B. als 4f-Transferoptik realisiert sein.

In die Detektionsoptik 2, d.h. zwischen dessen eintrittsseitiger Linse 2a
und dessen austrittsseitiger Linse 2b, ist ein Paar von photoelastischen
10 Modulatoren 6a, 6b herkömmlicher Bauart eingebracht, vorzugsweise
symmetrisch zu einer Zwischenbildebene 7 der Detektionsoptik 2, in
welcher sich die von einem Punkt der Objektiv-/Zwischenbildebene 3
ausgehenden Strahlen des Strahlenbündels 1 schneiden. Mit anderen
Worten liegt ein erster photoelastischer Modulator (PEM) 6a mit einem
15 gewissen Abstand a im Strahlengang vor dieser Zwischenebene 7,
während der andere PEM 6b mit dem gleichen Abstand a im Strahlen-
gang hinter dieser Zwischenebene 7 liegt. In der Zwischenebene 7 tref-
fen, wie gesagt, die von einem Punkt der Objekt-/Zwischenebene 3
ausgehenden Strahlen wieder zusammen, so dass durch die symme-
20 trische Lage der beiden PEMs 6a, 6b alle Strahlen des Strahlenbün-
dels 1 in guter Näherung die gleiche Retardation erfahren. Alternativ
sind jedoch andere Positionierungen der beiden PEMs 6a, 6b möglich,
je nach geforderter Messgenauigkeit und/oder Systemkalibrierung.

25 Die beiden PEMs 6a, 6b werden von einer Steuereinheit 8 einzeln
angesteuert, die außerdem eine Strahlungsquelle 9 ansteuert, die in
Fig. 1 nur schematisch angedeutet ist und das Strahlenbündel 1 erzeugt.
Bei der Strahlungsquelle 9 handelt es sich um eine gepulst betriebene
Strahlungsquelle 9, z.B. um einen Excimer-Laser mit Pulslängen von
30 typischerweise einigen zehn Nanosekunden. Solche Excimer-Laser
werden beispielsweise auch als Lichtquelle in der UV-Lithografie einge-

setzt. Alternativ sind auch andere gepulst betreibbare Strahlungsquellen verwendbar, wie Festkörperlaser mit oder ohne Frequenzvervielfachung.

Derartige Pulsdauern von typischerweise nur einigen zehn Nanosekunden sind kurz genug, um eine ausreichend gute Phasenauflösung bei den typischen Modulationsfrequenzen der PEMs 6a, 6b zu realisieren. So ergibt sich z.B. bei einer Pulsdauer von 20 ns und einer Modulationsfrequenz von 50 kHz eine Phasenunschärfe von einer Tausendstel Periode bzw. $0,36^\circ$. Dies ist vergleichbar mit der üblicherweise erreichbaren Positioniergenauigkeit einer drehbaren $\lambda/4$ -Platte.

Die Steuereinheit 8 triggert die gepulste Strahlungsquelle 9 abhängig von der Ansteuerung der PEMs 6a, 6b, d.h. sie aktiviert die gepulste Strahlungsquelle 9 zur Abgabe eines jeweiligen Strahlungspulses zu definierten Zeitpunkten, die abhängig vom momentanen Schwingungszustand PEMs 6a, 6b, speziell von den Phasenlagen ihrer Modulations- bzw. Retardationsschwingung, gewählt werden. Die Steuereinheit 8 arbeitet mit einer ausreichenden Bandbreite von z.B. etwa 50 MHz, so dass sie keine zusätzliche Phasenunschärfe aufgrund unpräziser Triggerung beim Auslösen der korrelierten Strahlungspulse verursacht.

In einer konkreten Anwendung dient die Anordnung von Fig. 1 z.B. zur PEM-basierten, bildaufgelösten Stokes-Polarimetrie an einem Probensystem 11, bei dem es sich insbesondere um ein optisches Abbildungssystem, beispielsweise um ein Mikrolithografie-Projektionsobjektiv, handeln kann, von dem je nach Anwendungsfall z.B. eine Objektebene oder Bildebene oder eine Pupille auf die Detektorfläche 4a abgebildet wird. Das Probensystem 11 wird dazu, wie in Fig. 1 schematisch gezeigt, an geeigneter in den Strahlengang des Strahlbündels 1 zwischen der gepulsten Strahlungsquelle 9 und der Detektionsoptik 2 eingebracht.

In nicht näher gezeigter Weise sind die drei polarisierenden Komponenten 5, 6a, 6b in vorgegebenen Orientierungen relativ zueinander in den Strahlengang des Strahlenbündels 1 eingebracht, z.B. der erste PEM 6a unter einem Winkel von 45° , der zweite PEM 6b unter einem Winkel von 0° und das Polarisationsselement 5 unter einem Winkel von $22,5^\circ$.

Nachfolgend wird unter zusätzlicher Bezugnahme auf Fig. 2 die konkrete Ermittlung des vollständigen Stokes-Vektors unter Verwendung der Anordnung von Fig. 1 anhand eines speziellen, nicht beschränkend zu verstehenden Beispiels näher erläutert, bei dem für die drei polarisierenden Komponenten 5, 6a und 6b die oben erwähnten Orientierungen von $22,5^\circ$, 45° bzw. 0° benutzt werden. Der Stokes-Vektor eines auf einer Hauptstrahlachse des Aufbaus von Fig. 1 eingestrahlt Lichtstrahls sei als Vektor (I,M,C,S) bezeichnet. Des weiteren sei die zeitabhängige Retardation des ersten, von der Steuereinheit 8 aktivierten PEM 6a mit α_1 und diejenige des zweiten, von der Steuereinheit 8 aktivierten PEM 6b mit α_2 bezeichnet. Mit diesen Bezeichnungen bestimmt sich für diesen Lichtstrahl eine Intensität INT auf der Detektorfläche 4a durch eine einfache Müller-Matrix-Rechnung gemäß folgender Intensitätsbeziehung:

$$INT = [2I + (M - C)\cos(\alpha_2) + S \cdot 2^{0,5}\sin(\alpha_1) + (M + C)\sin(\alpha_1)\sin(\alpha_2) + (M + C + S \cdot 2^{0,5}\sin(\alpha_2))\cos(\alpha_2)]/4.$$

Die Steuereinheit 8 regt dann die beiden PEMs 6a, 6b zu Schwingungen mit etwas unterschiedlichen Schwingungsfrequenzen an, so dass sich dementsprechend deren Phasendifferenz zeitlich ändert und sich gewünschte Phasenlagen für die Retardation der beiden PEMs 6a, 6b zu Triggerzeitpunkten ergeben, an denen die gepulste Strahlungsquelle 9 von der Steuereinheit 8 zur Erzeugung eines jeweiligen Strahlungspulses getriggert wird.

Fig. 2 zeigt hierzu ein Beispiel für den zeitlichen Verlauf der Retardation des ersten PEM 6a als Kennlinie R1 im oberen Teildiagramm und der Retardation des zweiten PEM 6b als Kennlinie R2 im zeitsynchron unter dem ersten Teildiagramm liegenden zweiten Teildiagramm. Die Schwingungsfrequenz der Modulation bzw. Retardation des ersten PEM 6a ist hierbei etwas größer gewählt als diejenige des zweiten PEM 6b, wie anhand der beiden Kennlinien R1 und R2 zu erkennen. Zu einem ersten Triggerzeitpunkt t_1 betragen die Retardationsphase α_1 des ersten PEM 6a und die Retardationsphase α_2 des zweiten PEM 6b jeweils 0° , d.h. $\alpha_1(t_1) = \alpha_2(t_1) = 0$. Zu einem späteren zweiten Triggerzeitpunkt t_2 ergeben sich die Retardationswerte $\alpha_1(t_2) = 0^\circ$ und $\alpha_2(t_2) = 90^\circ$. Zu einem späteren dritten Triggerzeitpunkt t_3 betragen sie $\alpha_1(t_3) = 90^\circ$ und $\alpha_2(t_3) = 0^\circ$. Zu einem späteren vierten Triggerzeitpunkt t_4 betragen beide Retardationsphasen $\alpha_1(t_4) = \alpha_2(t_4) = 90^\circ$.

Zu jedem Triggerzeitpunkt t_1, t_2, t_3, t_4 aktiviert die Steuereinheit 8 die gepulste Strahlungsquelle 9 zur Emission eines einzelnen Strahlungspulses. Wenn ein solcher einzelner Strahlungspuls für die Detektionsempfindlichkeit des Detektors 4 nicht ausreicht und dieser ein integrales Ansprechverhalten besitzt, wie dies z.B. bei einer CCD-Anordnung der Fall ist, wird für jeden der vier in Fig. 2 gezeigten Triggerzeitpunkte t_1 bis t_4 die Triggerung eines weiteren Strahlungspulses beliebig oft an der entsprechenden, periodisch wiederkehrenden Retardationsphasenlage der beiden PEM 6a, 6b wiederholt.

Einsetzen der Phasenlagen α_1, α_2 für die vier Triggerzeitpunkte t_1 bis t_4 von Fig. 2 in die obige Intensitätsbeziehung $\text{INT}(\alpha_1, \alpha_2)$ ergibt für die vier Messvorgänge an diesen Triggerzeitpunkten t_1 bis t_4 bzw. den wiederholten Triggervorgängen mit gleichem Wert des Retardationsphasenpaares (α_1, α_2) die folgenden Intensitätswerte

$$\text{INT}(t_1) = (I+M)/2$$

$$\text{INT}(t_2) = (2I+M+C-2^{0,5}S)/4$$

$$\text{INT}(t_3) = (2I+M-C+2^{0,5}S)/4$$

$$\text{INT}(t_4) = (2I+M+C+2^{0,5}S)/4$$

5

Zusammenfassen dieser vier Intensitätsgleichungen in Matrix-Schreibweise $\underline{\text{INT}} = \underline{\text{TM}} \cdot \underline{\text{SV}}$, mit dem Intensitätsvektor $\underline{\text{INT}} = (\text{INT}(t_1), \text{INT}(t_2), \text{INT}(t_3), \text{INT}(t_4))^T$ und dem Stokes-Vektor $\underline{\text{SV}} = (I, M, C, S)^T$ führt nach Invertieren der Matrix $\underline{\text{TM}}$ zu der Gleichung $\underline{\text{SV}} = \underline{\text{TM}}^{-1} \cdot \underline{\text{INT}}$, wobei

10

$$\underline{\text{TM}}^{-1} = \begin{bmatrix} -2 & 2 & 2 & 0 \\ 4 & -2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 2 \\ 0 & -\sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix}.$$

15

Somit lässt sich durch die vier Intensitätsmessungen der vollständige Stokes-Vektor $\underline{\text{SV}}$ und damit der Polarisationszustand des eingestrah-

ten Lichtstrahls bestimmen. Es versteht sich, dass das zur obigen Beschreibung gewählte Zahlenbeispiel nicht beschränkend zu verstehen ist und lediglich zu relativ einfachen Werten der Matrix $\underline{\text{TM}}$ führt. Es sind selbstverständlich alternative Messvorgänge zu anderen Triggerzeit-

punkten verwendbar, wenn deren zugehörige Retardationsphasenpaare

(α_1, α_2) zu mindestens vier linear unabhängigen Gleichungen der detek-

tierten Intensität INT in Abhängigkeit von den Stokes-Vektorelementen I, M, C, S führen.

20

25

Für die Differenz der Modulationsfrequenzen der beiden PEMs 6a, 6b sind in der Praxis beispielsweise Werte in der Größenordnung von 1 kHz günstig, da sich dann die wiederholte Triggerung der gepulsten Strahlungsquelle 9 bei der gewünschten Retardationsphasenlage sehr gut an die Wiederholrate eines typischen Excimerlasers in der Größenordnung von 1 kHz bis 4 kHz anpassen lässt.

30

Außer einer Bestimmung des vollständigen Stokes-Vektors kann mittels entsprechend anderer Triggersequenzen je nach Bedarf auch eine Untermenge von Stokes-Vektoren mit eingeschränkten Eigenschaften, z.B. nur linear oder nur zirkular polarisierte Zustände, bestimmt werden, indem die Steuereinheit 8 die Korrelation zwischen der Aktivierung der PEMs 6a, 6b und der gepulsten Strahlungsquelle 9 geeignet wählt.

Es versteht sich, dass die beschriebene Auswertung der Detektorinformationen, insbesondere der orts aufgelösten Intensitätswerte, durch die Auswerteeinheit 10 erfolgt, die hierzu geeignet ausgelegt ist.

Bei Verwendung eines ortsauflösenden Detektors, der in Echtzeit mit hoher Bandbreite arbeitet, wie Diodenzeilen und Diodenarrays, ist es zur Bestimmung der Stokes-Parameter nicht zwingend erforderlich, die besonderen Eigenschaften der korreliert getriggerten Strahlungspulse zu verwenden, vielmehr reicht in diesem Fall gegebenenfalls auch die herkömmliche Auswertemethode mittels Frequenzanalyse für die einzelnen Pixelsignale des Detektors aus.

Die Messung der Stokes-Vektoren bei verschiedenen Polarisationszuständen der Beleuchtung eines Objektes kann außerdem zur Bestimmung einer bildfeld aufgelösten Müller-Matrix verwendet werden, aus der wiederum eine bildfeld aufgelöste Jones-Matrix bestimmt werden kann. In dieser Weise eignet sich das erfindungsgemäße Verfahren auch für eine zweidimensionale Charakterisierung von Strukturen mit Abmessungen im Subwellenlängenbereich. Durch Verwenden von gepulsten UV-Lichtquellen kann diese Charakterisierung für Nanostrukturen mit Strukturelementbreiten kleiner als 100 nm durchgeführt werden. Dies kann z.B. in der CD-Metrologie und der Defektinspektion von Halbleiterwafern und Photomasken nutzbringend eingesetzt werden.

Die Vorrichtung und das Verfahren der Erfindung, wie sie oben anhand der Fig. 1 und 2 für exemplarische Realisierungen erläutert wurden, eignen sich insbesondere auch zur orts aufgelösten bzw. pupillen-
aufgelösten Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands
5 durch ein untersuchtes optisches Abbildungssystem, wie eines Mikrolithografie-Projektionsobjektivs, das hierbei in Kombination mit einer interferometrischen Wellenfrontmesstechnik hinsichtlich seines Aberrationsverhaltens polarisationsempfindlich vermessen werden kann. Zu diesem Zweck wird eine entsprechende Vermessungsvorrichtung, wie
10 sie in den eingangs erwähnten Voranmeldungen der Anmelderin beschrieben sind, dahingehend modifiziert, dass insbesondere in einem Detektionsteil der Vermessungsvorrichtung die beiden PEMs, wie vorliegend vorgeschlagen, als Polarisationsdrehelemente mit variablem Polarisationswinkel eingesetzt werden, insbesondere anstelle von dreh-
15 beweglichen Polarisationselementen, wie $\lambda/4$ -Platten, und dass eine korreliert getriggerte, gepulste Strahlungsquelle verwendet wird.

So kann z.B. die in der Fig. 1 der eingangs angegebenen, älteren Anmeldungen gezeigte Vorrichtung, die zur Bestimmung der Beeinflussung
20 des Polarisationszustands durch ein Mikrolithografie-Projektionsobjektiv mittels ellipsometrischer Messung dient, dahin gehend modifiziert werden, dass detektorseitig statt des dortigen drehbaren Kompensators, der einer niederaperturigen Detektionsoptik nachgeschaltet ist, die beiden PEMs 6a, 6b in der vorliegenden, erfindungsgemäßen Anord-
25 nung, z.B. gemäß der vorliegenden Fig. 1, eingesetzt werden und als Strahlungsquelle ein gepulste Strahlungsquelle verwendet wird, wie die gepulste Strahlungsquelle 9 der vorliegenden Fig. 1, und zusätzlich die Steuereinheit 8 gemäß der vorliegenden Fig. 1 zur gekoppelten Ansteuerung der beiden PEMs 6a, 6b und der gepulsten Strahlungsquelle
30 9 vorgesehen wird. Damit lässt sich dann orts aufgelöst bzw. pupillen-
aufgelöst die phasenreduzierte Jones-Matrix bestimmen, wie in den

Voranmeldungen detailliert beschrieben, vorliegend ohne drehbewegliche Polarisationsselemente im Detektionsteil.

- Ein entsprechender Einsatz der beiden PEMs 6a, 6b anstelle eines drehbeweglichen Polarisators oder Kompensators in Kombination mit der Verwendung einer gepulsten Strahlungsquelle und der Steuereinheit zur gekoppelten Ansteuerung der gepulsten Strahlungsquelle und der beiden PEMs 6a, 6b ist z.B. auch in den Vorrichtungen gemäß den Fig. 2 und 4 der beiden Voranmeldungen möglich, so dass die entsprechend modifizierten Vorrichtungen mit weniger oder ohne drehbewegliche Polarisationsselemente auskommen. Dabei ermöglicht dann die aus Fig. 2 der Voranmeldungen abgeleitete, modifizierte Vorrichtung eine Bestimmung der vollständigen Jones-Matrix z.B. für ein Mikrolithografie-Projektionsobjektiv als zu vermessendes Probensystem, wenn die phasenreduzierte Jones-Matrix bereits bekannt ist, z.B. aus einer Messung mit der Vorrichtung von Fig. 1 der Voranmeldungen bzw. mit der entsprechend modifizierten erfindungsgemäßen Vorrichtung, wie oben erläutert. Die durch die erwähnte Modifikation der Vorrichtung von Fig. 4 der Voranmeldungen bereitgestellte Vorrichtung ermöglicht die Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix, wobei erfindungsgemäß statt des detektorseitigen drehbaren Polarisators das PEM-Paar 6a, 6b eingesetzt wird. Es versteht sich, dass je nach Bedarf auch in anderen Ausführungsbeispielen der beiden Voranmeldungen und in beliebigen anderen herkömmlichen Vorrichtungen zur orts aufgelösten Stokes-Polarimetrie eines Strahlenbündels der erfindungsgemäße Einsatz eines PEM-Paars in Verbindung mit einer gepulsten Strahlungsquelle und einer korrelierten Ansteuerung der gepulsten Strahlungsquelle und des PEM-Paars möglich ist.
- Der Wegfall von mechanisch drehbaren und zu positionierenden Polarisationsselementen ermöglicht für das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung eine vergleichsweise geringe Mess-

zeit, zudem entfällt das Verschleissproblem und damit das Ausfallrisiko solcher mechanisch drehbarer Polarisatoren oder Kompensatoren. Während aufgrund der Positioniertoleranzen bei mechanisch drehbaren Polarisations-elementen nur relativ geringe Winkelgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 1 U/min möglich sind, die zu einer Messdauer von ca. 30 s für eine vollständige Messung des Polarisationszustands eines bildgebenden Strahlenbündels führen, lassen sich durch die Erfindung deutlich kürzere Messzeiten erzielen. Daher ermöglicht die Erfindung auch die Erfassung von schnelleren Änderungen des Polarisationszustands ohne Beeinträchtigung durch einen Mittelungseffekt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur orts aufgelösten polarimetrischen Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels (1), das von einer zugehörigen Strahlungsquelle (9) erzeugt wird, mit folgenden Schritten:
 - Einbringen eines ersten photoelastischen Modulators (6a), eines zweiten photoelastischen Modulators (6b) und eines Polarisationselements (5) seriell in das Strahlenbündel (1),
 - Aktivieren einer ersten Modulationsschwingung des ersten photoelastischen Modulators und einer zweiten Modulationsschwingung des zweiten photoelastischen Modulators,
 - Verwenden einer gepulsten Strahlungsquelle (9) zur Erzeugung des Strahlenbündels und Ansteuern der Strahlungsquelle zum Abgeben eines jeweiligen Strahlungspulses in Abhängigkeit vom Schwingungszustand des ersten photoelastischen Modulators und/oder des zweiten photoelastischen Modulators und
 - orts aufgelöstes Detektieren des vom Polarisationselement (5) kommenden Strahlenbündels.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die erste und die zweite Modulationsschwingung mit unterschiedlichen Schwingungsfrequenzen aktiviert werden und mehrere Messvorgänge bei unterschiedlichen Phasenlagen der beiden Modulationsschwingungen der photoelastischen Modulatoren durchgeführt werden und anhand der Messresultate ein orts aufgelöster Stokes-Vektor bestimmt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei wenigstens vier Messvorgänge bei den Phasenwinkelpaaren (α, β) , $(\alpha, \beta + 90^\circ)$, $(\alpha + 90^\circ, \beta)$ und $(\alpha + 90^\circ, \beta + 90^\circ)$ der Phasenlagen der beiden Modulationsschwingungen der photoelastischen Modulatoren durchgeführt werden, wobei α und β vorgebbare Phasenwinkel bezeichnen.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Phasenwinkel α und β beide zu 0° vorgegeben werden.
5. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Differenz der Schwingungsfrequenzen der beiden photoelastischen Modulatoren im Bereich zwischen 0,1 kHz und 10 kHz gewählt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die Schwingungsfrequenzdifferenz im Bereich um 1 kHz gewählt wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei ein bildgebendes Strahlenbündel eines in den Strahlengang des Strahlenbündels eingebrachten Probensystems untersucht wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei das Probensystem ein Projektionsobjektiv einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage ist.
9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei die Untersuchung des bildgebenden Strahlenbündels des weiteren eine interferometrische Wellenfrontvermessung des Projektionsobjektivs umfasst.
10. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die beiden photoelastischen Modulatoren mit im Wesentlichen gleichem Abstand (a) von einem Konvergenzpunkt (7) des Strahlenbündels positioniert werden.
11. Vorrichtung zur orts aufgelösten polarimetrischen Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels (1), mit
 - einer gepulsten Strahlungsquelle (9) zur Erzeugung des Strahlenbündels,
 - einem ersten photoelastischen Modulator (6a), einem zweiten photoelastischen Modulator (6b) und einem Polarisationsselement

- (5), die seriell im Strahlengang des Strahlenbündels positionierbar sind,
- einer Steuereinheit (8) zur Steuerung der photoelastischen Modulatoren (6a, 6b) und zur damit korrelierten Ansteuerung der gepulsten Strahlungsquelle und
 - einem Detektor (4) zum orts aufgelösten Detektieren des vom Polarisationsselement kommenden Strahlenbündels.
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei eine Auswerteeinheit (10) vorgesehen ist, die anhand der Detektionsinformationen vom Detektor (4) einen orts aufgelösten Stokes-Vektor bestimmt.
13. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei sie zur orts aufgelösten polarimetrischen Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels eines Probensystems eingerichtet ist.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13, wobei das Probensystem ein optisches Abbildungssystem ist und die Untersuchung eine pupillenaufgelöste interferometrische Wellenfrontvermessung des optischen Abbildungssystems umfasst.
15. Vorrichtung nach Anspruch 14, wobei das Probensystem ein Mikrolithografie-Projektionsobjektiv ist.

Zusammenfassung

1. Verfahren und Vorrichtung zur orts aufgelösten Polarimetrie.
 - 2.1. Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur orts aufgelösten polarimetrischen Untersuchung eines bildgebenden Strahlenbündels, das von einer zugehörigen gepulsten Strahlungsquelle erzeugt wird.
 - 2.2. Erfindungsgemäß werden ein erster und ein zweiter photoelastischer Modulator sowie ein Polarisationsselement seriell in den Strahlengang des Strahlenbündels eingebracht. Eine Steuereinheit aktiviert eine erste Modulationsschwingung des ersten photoelastischen Modulators und eine zweite Modulationsschwingung des zweiten photoelastischen Modulators und steuert die Strahlungsquelle zum Abgeben eines jeweiligen Strahlungspulses in Abhängigkeit vom Schwingungszustand des ersten photoelastischen Modulators und/oder des zweiten photoelastischen Modulators an. Ein Detektor detektiert orts aufgelöst das vom Polarisationsselement kommende Strahlenbündel.
 - 2.3. Verwendung z.B. zur pupillenaufgelösten, polarisationsempfindlichen Wellenfrontvermessung von Projektionsobjektiven für die Mikrolithografie.

- - - - -